

# DC 초전도케이블 개발 현황



황 시 돌  
한국전력공사 전력연구원 책임연구원

## 1. 개 황

초전도 전력케이블은 기존 전력케이블과 달리 전류 밀도가 높고 손실이 적은 특징을 갖고 있어 대용량 송전에 적합하며, 에너지 절약이나 누설자속 저감 등의

환경적인 측면에서도 유리하다. 따라서 현재까지 국내 외적으로 초전도체를 이용한 교류 전력케이블에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 미국을 비롯한 일부 선진국에서는 수년 전부터 실제의 전력계통에 설치하

여 시범운전을 실시하고 있다. 우리나라도 10월중 이전 변전소에 교류 22.9kV, 50MVA, 길이 500m급 초전도 케이블이 설치될 예정이다.

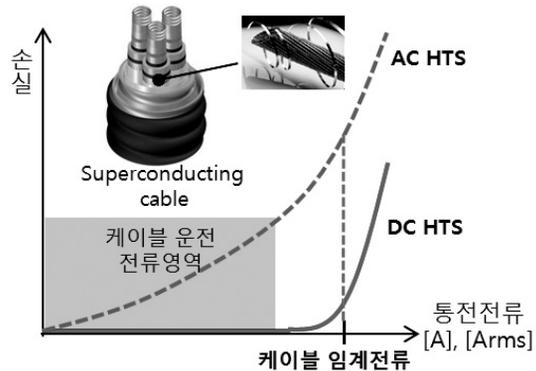
한편, 초전도 재료에 있어 저항이 완전하게 '0'으로 되는 것은 직류 전류를 흘렸을 경우이며, 교류 초전도 케이블의 경우 전류가 통과할 때 기존케이블 보다는 적지만 손실이 발생한다. 이것을 보통 '교류 손실'이라고 부르며 교류 초전도케이블은 교류손실 문제 외에 단락 전류 대책과 초전도 도체에 흐르는 전류를 균일화하기 위한 균류화 도체 구조 등 교류 초전도케이블 고유의 문제를 해결할 필요가 있다. 최근 이러한 교류 초전도 케이블의 문제를 해결하기 위한 방안으로 직류 초전도 케이블이 각광을 받고 있으며, 향후 변환기의 고성능화, 저가격화 등이 실현되면 교류 초전도케이블 이상으로 응용 효과가 높을 것으로 기대된다.

우리나라도 올해 6월부터 정부와 기업(한국전력공사 및 LS전선주식회사)이 공동으로 직류 초전도케이블에 관한 연구를 시작했다.

## 2. 직류 초전도케이블의 장점

직류 초전도케이블의 주요 장점은 낮은 손실, 콤팩트한 구조, 대용량 송전 등이다. 직류 초전도케이블의 도체저항은 완전히 '0'이므로 도체손실이 없고, 초전도선의 수를 증가시키면 케이블 당 송전용량이 증가된다. 유일한 손실원은 외부(단열관 또는 전류도입부)로부터의 열 침입으로써 단위 길이당 냉각 용량 및 송전 손실을 등이 크게 감소될 수 있다. 또한 기존 구리 교류케이블에서는 최대 전류용량이 존재한다. 교류 고온 초전도케이블에서는 그림 1에서 보듯이 전류용량 증가에 비례하여 손실이 증가하고 통전전류가 임계전류 값에 접

근하면 손실은 기하급수적으로 증가하게 된다. 이에 따라 교류 초전도케이블인 경우 정격전류를 임계전류의 70% 이하로 정하여 운전해야 하므로 초전도 선재(도체)측면에서 비효율적이다.



AC, DC 초전도 케이블의 손실률

[그림 1] 교류와 직류 고온 초전도케이블의 특성

그러나 직류 초전도케이블은 단열성능을 향상시켜 외부 열침입을 감소시키면 허용전류를 높일 수 있으며, 장거리 송전에 따른 송전손실 증가가 없기 때문에 냉각 시스템의 부담이 경감될 수 있다. 더불어 직류 초전도 케이블은 외부 전자파 장애가 전혀 없으며, 절연성능도 우수하다는 장점을 가진다.

그림 2는 기존 케이블, 교류 초전도케이블, 직류 초전도케이블의 손실 및 CO<sub>2</sub> 저감 효과에 대하여 1.5[GVA] 송전을 가정하여 일본의 케이블 메이커인 스미토모 회사에서 만든 예측자료이다. 상호 비교결과, 포설되는 케이블의 가닥 수는 교류 초전도케이블이 기존 케이블에 비해 절반으로, 직류 초전도케이블은 교류 초전도케이블의 1/4로 줄어든다. 송전손실과 CO<sub>2</sub> 배출량의 경우, 교류 초전도케이블은 기존 케이블에 비해 1/4, 직

		AC		DC
		Conventional Cable	HTS Cable	HTS Cable
Transmission Capacity		1500MVA(500MVA x 3cct)	ditto(375MVAx2cctx2Route)	ditto(1500MVA x 1cct)
Transmission Voltage		275kVrms	66kVrms	130kV
Transmission Current		1kArms/phase	3.3kArms/phase	12kA/phase
Cable Type		Single phase XLPE Cable	3-in-One HTS Cable	3-in-One HTS Cable
Cable Size		Approx. 140mm	Approx. 135mm	Approx. 135mm
Number of Cables		9	4 $\frac{1}{2}$	1 $\frac{1}{4}$
Transmission Loss		740kW/km	200kW/km	20kW/km
CO2 Emission*2 (CO2 Reduction)		778ton-C/km/year(-)	210ton-C/km/year (568ton-C/km/year)	21ton-C/km/year (757ton-C/km/year)
Transmission Loss Cost*2 (Cost Reduction)		648,000/km/year(-)	175,000\$/km/year (473,000\$/km/year)	18,000\$/km/year (630,000\$/km/year)
NPV of Loss (30years, int. 5%)		(-)	+7.28M\$/km (473x15.4)	+9.7M\$/km (630x15.4)
Emissions Trading (30years)	50S/t-c	(-)	+0.825M\$/km (50x568x30)	+1.136M\$/km (50x757x30)
	100S/t-c	(-)	+1.7M\$/km (100x568x30)	+2.27M\$/km (100x757x30)

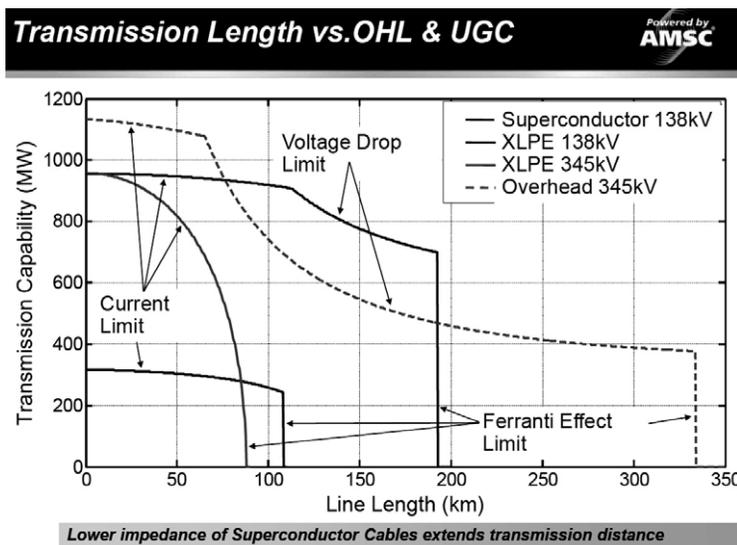
\*1 Calculated at carbon conversion rate of 0.12kg-C/kWh  
 \*2 Calculated at per kWh generation Cost of 10cents

[그림 2] 케이블 비교 데이터

류 초전도케이블은 교류 초전도케이블에 비해 1/10이 된다.

그림 3은 미국의 초전도 선재 메이커인 AMSC 회사에서 기존 가공 송전선로, 기존 지중케이블, 교류 초전도케이블을 대상으로 길이에 따른 송전용량을 비교한

데이터이다. 교류 138kV 초전도케이블의 거리에 따른 송전용량을 기존의 138kV, 35kV XLPE 케이블과 비교하면 상대적으로 우수한 특성을 갖는 것을 확인할 수 있다.

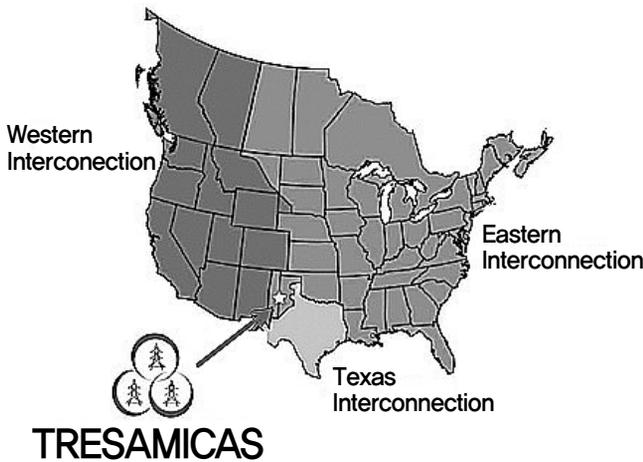


[그림 3] 송전선로(가공, 지중, 초전도) 비교

### 3. 직류 초전도케이블 개발 동향

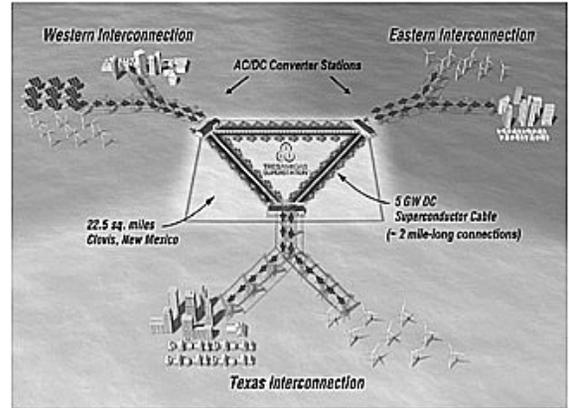
#### 가. 미국의 직류 초전도케이블 프로젝트

미국의 전력계통은 그림 4와 같이 주파수가 60Hz로 통일되어 있지만 동부, 서부, 남부(텍사스) 등 3개의 계통이 서로 동기화되어 있지 않고 독립적으로 분리되어 있다. 전력계통이 독립적으로 분리되어 운전하게 되면 여러 가지 형태의 비효율성이 존재하기 때문에 그림 5와 같이 직류 초전도케이블을 사용하여 3개의 계통을 서로 연결하려는 시도가 이루어지고 있다. '세 친구'라는 뜻의 'Tres Amigas 프로젝트'는 200kV, 5GW, 12.5kA급의 직류 초전도케이블을 삼각형으로 배치하며 한 변의 길이는 3.2km이고, 각 변은 2회선으로 설치할 계획이므로 총 길이는 19.2km이다.



[그림 4] 세 부분으로 분리된 미국의 전력계통

'Tres Amigas 프로젝트'는 주변 태양광 및 풍력 발전소에서 생산하는 전력의 자유로운 계통연계 통로가 될 뿐만 아니라 미국내 최초의 신재생에너지 시장용 전력허브가 될 수 있을 것으로 기대되고 있다.



[그림 5] Tres Amigas Super Station 개념도

#### 나. 일본의 직류 초전도케이블 프로젝트

일본 중부대학의 야마구치 교수팀은 200m급 직류 초전도케이블을 개발하여 2010년 2월경 통전시험에 성공하였다. 이 케이블은 스미토모공업사의 Bi계 선재를 사용하였고, 냉매인 액체질소의 순환최적화 기술 등에 의해 송전거리의 연장이 가능하였다. 향후 약 1년에 걸쳐서 시스템을 조정하여 안정성을 향상시키고, 2011년도에는 대학 내에서 데이터센터용 배전선로 및 태양전지와의 연계실험을 수행할 예정이다.

#### 다. 중국의 직류 초전도케이블 프로젝트

중국의 IEE-CAS(Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences)는 직류 고온 초전도케이블 과제를 추진 중에 있다.

2010년 운전시작을 목표로 1.3kV, 10kA급으로 개발하고 있으며, 절연방식은 현재 전 세계적으로 주로 개발되고 있는 Cold Dielectric 방식이 아닌 Warm Dielectric 방식을 채택하고 있다. 전류값으로 본다면 세계에서 가장 높은 전류를 직류 초전도케이블로 전송하는 프로젝트가 된다. 길이는 380m이며, 특정 공장에 필요한 직류 전력을 공급하기 위한 것이 설치 목적이다.

#### 4. 우리나라의 직류 초전도케이블 개발 계획

외국과 마찬가지로 우리나라도 초전도케이블은 교류부터 시작하였다. 교류 초전도케이블 연구의 역사는 이미 10년을 넘어서고 있으며, 금년 10월 경 실제의 전력 계통에 설치하여 내년부터는 본격적으로 상업운전에 들어갈 예정이다. 그러나 직류 초전도케이블은 많은 장점을 가졌음에도 불구하고 최근까지 관심의 대상이 되지 못하였다. 그 이유는 냉각설비와 변환설비의 추가비용에 있다. 직류 초전도케이블은 냉각장치와 더불어 변환설비가 필요하기 때문에 기존의 직류케이블 혹은 교류 초전도케이블에 비하여 경쟁력을 가지는 경우는 장거리 송전을 할 때이다. 즉, 변환설비와 냉각설비 등에 소요되는 추가비용이 손실저감 등에 의하여 얻어지는 유지비 절감액보다 적어야 한다.

그러나 최근 들어 변환설비의 제조비용이 낮아지고 있으며, 장거리 냉각기술도 어느 정도 축적됨에 따라 직류 초전도케이블에 대한 관심이 높아져 가는 추세이며, 우리나라도 올해 6월부터 정부와 기업이 공동으로 직류 초전도케이블 연구를 착수하기에 이르렀다. 우선 1년 동안 타당성 조사 성격의 연구수행 이후 어느 정도 가능성이 보일 경우 본격적인 연구가 진행될 예정이다.

#### 가. 진행 중인 직류 초전도케이블 연구개발 과제

올해 시작한 직류 초전도케이블 연구과제의 연구기간은 1년이며, 공동연구를 수행하는 두 기업의 역할은 각 기업의 특성에 맞도록 구분하였다. 한국전력공사는 직류 초전도케이블의 적용이 가능한 국내송전선로 조

사, 전력 변환기를 통해 유입되는 고조파가 미치는 영향과 이에 따른 손실을 줄일 수 있는 대응방안을 조사한다.

LS전선은 이번 프로젝트에서 직류 초전도케이블 시스템의 핵심 부품인 단말장치, 중간 접속함의 제작 기술 개발과 시스템에 사용되는 절연 재료의 성능을 평가하고 이를 바탕으로 절연설계 기반 구축을 수행한다. 아울러 두 회사는 직류 초전도 케이블 평가기술 연구도 진행한다. 아직 초전도 케이블에 대한 국제 규격이 정립되어 있지 않았기 때문에 본 과제수행을 통해 향후 국제규격 제정에 큰 영향력을 발휘할 수 있을 것으로 기대하고 있으며, 연구목표와 주요 내용을 살펴 보면 다음과 같다.

- 직류 초전도 케이블 적용기술 연구
  - 전압레벨에 따른 국내 적용 개소 조사 및 분석
  - DC Harmonics 및 고조파의 계통 영향 분석
- 직류 초전도케이블 및 단말 기초 설계
  - 절연 설계 기반 구축
  - 핵심 부품 제작 기술 연구
- 직류 초전도케이블 평가 기술 연구
  - 케이블 시험 방안
  - (직류 초전도케이블 Type Test) 제시
  - 케이블 평가 인프라 최적 설계
  - (고전압, 대전류, 냉각설비 등)

## 나. 직류 초전도케이블 연구 2단계 추진계획

일년 동안 타당성 조사 연구 성격의 직류 초전도케이블 연구를 수행하여 그 결과가 좋을 경우 본격적으로 2단계 연구개발에 돌입할 예정이다. 우선 1km급 정도의 장거리 직류케이블을 개발하는 것을 목표로 하여 케이블 자체의 개발과 극저온 냉각설비의 개발을 동시에 진행하는 것이 실용화를 앞당기는데 도움이 될 것으로 보인다. 최근 에너지기술평가원의 '2011년도 에너지기술개발사업 기술수요조사 공모'가 마감되었는데, 그 때 한국전력공사와 LS전선이 공동으로 제안한 내용에 대하여 요약한다.

- 기술명 : 대용량 직류 초전도케이블 시스템 개발
- 개발목표 : 80kV 이상 송전급 직류 초전도케이블 시스템 개발
- 주요 개발내용
  - 직류 초전도케이블 실계통 적용을 위한 계통해석 및 설계사양 검토
  - 직류 초전도 케이블 개발 [80kV, 200(250)kV]
  - 직류 초전도 케이블 단말/접속함 개발
  - 장거리선로 열응력 완충 및 Cryostat 고진공 유지기술 개발
  - 직류초전도 케이블 양산기술 개발
  - 실증시험용 대용량 냉각 및 냉동 시스템 개발
  - 80kV 수백 MW급 실증시험선로 설치 및 운영
  - 직류초전도 케이블 Type/PQ Test

- 실계통 실증시험방안 및 직류 초전도케이블 미래계통 적용방안 수립

## 5. 전망

국제적으로도 연구개발이 이제 시작 단계에 있는 직류 초전도케이블의 개요와 국제적인 연구동향 그리고 우리나라의 연구현황 등에 대하여 간단히 설명하였다. 앞에서 언급한 것과 같이 직류 초전도케이블의 효과는 장거리 송전을 할 때 극대화 될 것이 확실하다. 그 이유는 직류 초전도케이블에는 변환설비와 냉각설비가 모두 필요하므로 단거리 송전에 있어서는 교류 초전도케이블이나 기존의 직류케이블에 비하여 경제성이 떨어지기 때문이다. 초전도케이블의 장거리화를 위해서는 냉각설비의 장거리화가 관건이므로 직류 초전도케이블이 경제성을 갖기 위해서는 장거리 냉각기술도 함께 개발되어야 한다. 지금까지 국내에서 10년 이상 쌓아 온 교류 초전도케이블 기술을 바탕으로 직류 초전도케이블 자체 기술과 극저온 냉각기술을 착실히 연구한다면 우리나라가 이 분야에 있어서도 세계 선두 주자로 입지를 구축할 전망이며, 또 하나의 미래 성장동력을 확보하는 쾌거가 될 것으로 예상된다. KEA